３．７　GPS 観測による詳細地殻変動分布の解明

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　GPS 観測による詳細地殻変動分布の解明

(b) 担当者

所　属	役　職	氏　名
国土地理院地理地殻活動研究センター	主任研究官	西村　卓也
地殻変動研究室	主任研究官	矢来　博司
	研究官	水藤　尚
国立大学法人　名古屋大学大学院環境学研究科	助教授	鷺谷　威

(c) 業務の目的

糸魚川－静岡構造線断層帯（以下糸静線）の周辺において GPS の稠密なキャンペーン観測を繰り返し実施し、周囲の GPS 連続観測点のデータと合わせて解析することにより当該地域における地殻変動の詳細な分布を明らかにし、断層帯周辺における応力蓄積過程を検討するための基礎データを提供する。

(d) ５ヵ年の年次実施計画

1) 平成 17 年度：

パイロット的重点観測で設置した 27 ヶ所のキャンペーン観測点において GPS 観測を実施し、周辺の連続観測点とともに解析を行なって、糸静線北部・中部の詳細地殻変動を明らかにした。

2) 平成 18 年度：

糸静線中部（諏訪湖周辺）に８ヶ所の観測点を新設し、既存の糸静線北・中部の観測点 20 ヶ所あわせた 28 ヶ所において GPS 観測を実施する。

3) 平成 19 年度：

パイロット的重点観測と平成 18 年度に設置する観測点の中から、観測条件の良好な 28 ヶ所において GPS キャンペーン観測を実施する。

4) 平成 20 年度：

パイロット的重点観測と平成 18 年度に設置する観測点の中から、28 ヶ所において GPS キャンペーン観測を実施し、糸静線中部（諏訪湖周辺）における詳細地殻変動を明らかにする。

5) 平成 21 年度：

パイロット的重点観測と本重点観測で設置した全ての観測点において GPS キャンペーン観測を実施し、糸静線中部と北部を合わせた観測調査地域全体の詳細地殻変動分布の解明とモデル化を行なう。

(e) 平成 17 年度業務目的

糸静線の北部・中部周辺における GPS キャンペーン観測を実施し、周囲の GPS 連続観測点のデータ、平成 16 年度までのパイロット的重点観測で得られたデータと合わせて解析し、当該地域における地殻変動の詳細な分布を明らかにする。また、平成 16 年度に発生した地震（2004 年紀伊半島南東沖地震と 2004 年新潟県中越地震）のキャンペーン観測に与える影響を調べる。

(2) 平成 17 年度の成果

(a)業務の要約

糸静線の中部から北部におけるキャンペーン観測点（平成 14 年にパイロット的研究で設置）において、パイロット的研究から通算 4 回目の GPS 観測を実施した。過去 4 回の GPS キャンペーン観測と周囲の連続観測点のデータを合わせて解析する事により、数 mm/年の精度で断層周辺の詳細地殻変動分布を明らかにすることができた。観測された地殻変動の特徴をまとめると、(1)長野盆地西縁断層の西側は東向きの速度を持ち、断層付近の狭い範囲に変形が集中している。(2)中央隆起帯では変形が非常に小さく、長野市以南では、その西縁付近が変形フロントになっている。(3)明科(S036)付近を境に、北では逆断層型（西北西－東南東方向の短縮）、南では左横ずれ型と変形パターンが変わる。(4)従って、牛伏寺断層や糸静線中部（諏訪湖以南）は基本的に横ずれである。(5)跡津川の南東側では、全体的にベクトルが時計方向に回転しており、跡津川断層系が力学境界として機能している、の 5 点が挙げられる。糸静線北部の白馬－大町付近と松本付近では、変形様式が

図 1　キャンペーン観測点の例

大きく異なり、地震発生に関する応力蓄積メカニズムも異なると考えられる。

(b)業務の実施方法

観測を行った地域は長野市、上田市、諏訪市、塩尻市、岐阜県高山市（旧上宝村)、白馬村を結んだ範囲である。観測点は平成 14(2002)年に、GPS の稠密キャンペーン観測用として最短 5km 程度の間隔で 28 ヶ所に設置しており､それぞれ安定した構造物に金属製のボルトを埋設してある。平成 17 年 10 月 31 日から 11 月 16 日にかけて、ボルトに GPS アンテナを固定して観測を行った。観測点を２つのグループに分け、各グループについて１週間ずつの観測を行ったが、１ヶ所で施設の都合のため観測を行なうことができなかった。観測点の一覧を表１に、観測中の様子を図１に示す。

(c)業務の成果

キャンペーン観測によって得られたデータは、周囲の GPS 連続観測点のデータと一緒に解析を行った。１日毎のデータから日座標値を求めた結果の例を図２に示す。キャンペーン観測点、連続観測点とも、毎年の観測における日座標値の再現性は数 mm 程度と良好であり、また、毎年の座標値を比較しても長期的な再現性が非常に高いことが分かる。この座標値に基づいて速度ベクトルを計算した結果を図３に示す。2002 年と 2003 年の観測の間に GEONET 観測点ではアンテナ交換が行われているため、座標値が水平、上下とも不連続になっている。そのため、速度推定は 2003 年以降の観測値を用いて行った。

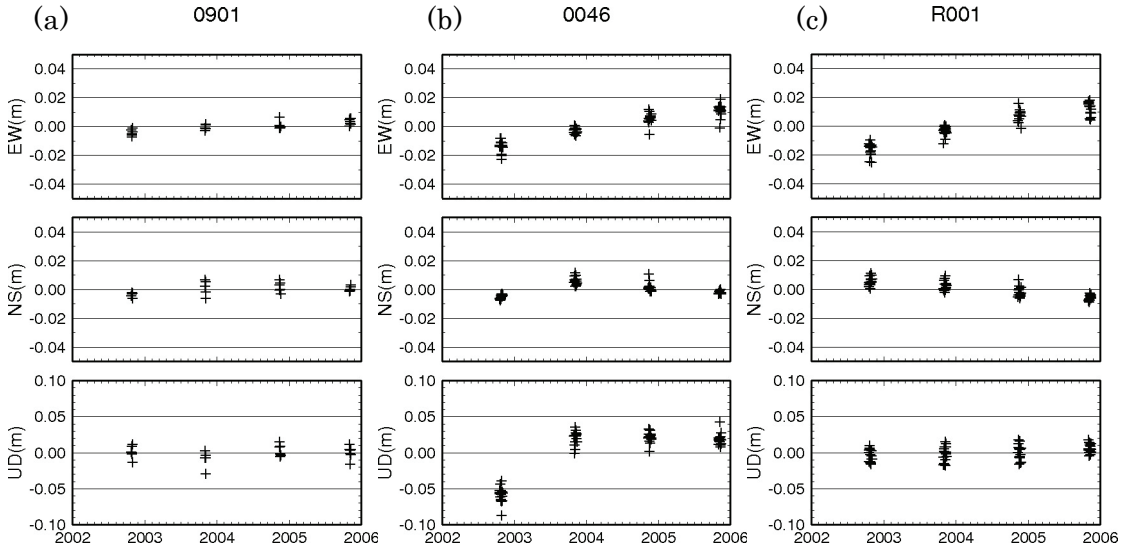

図２　キャンペーン観測による座標の時系列

(a)02R901（キャンペーン観測点）(b) 940046（連続観測点、アンテナ交換あり）

(c)99R001（連続観測点、アンテナ交換無し）

図３は臼田の IGS 観測点を基準とする速度ベクトルで、青いベクトルが本キャンペーン観測の結果、紫のベクトルがルーチン的な連続観測の結果(2001-2002 年)である。全体的な傾向から外れる点も幾つか見られるが､基本的に両者が良く一致していることが分かる。数年にわたって一様な速度で地殻変動が進行している状況であれば、キャンペーン観測で mm/年程度の精度の観測が十分可能である。

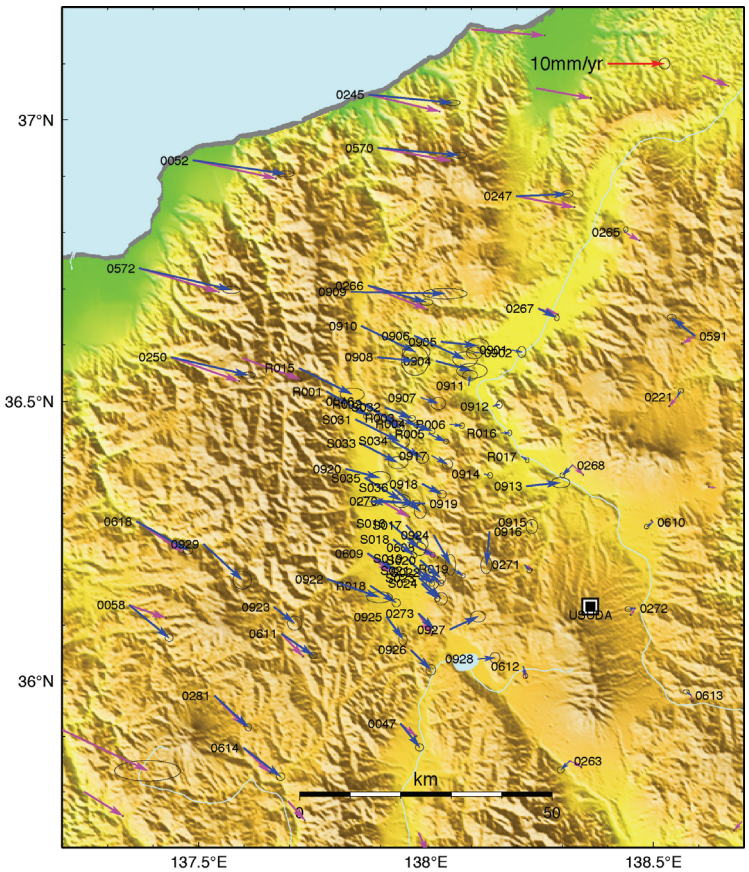

図３　糸魚川－静岡構造線断層帯周辺の水平地殻変動速度分布
2003－2005 年の稠密キャンペーン観測によるベクトルを青い矢印、連続観測点における 2001-2002 年の日座標値データから推定された速度ベクトルを紫の矢印で表す。ベクトルの固定点は臼田(USUDA)。

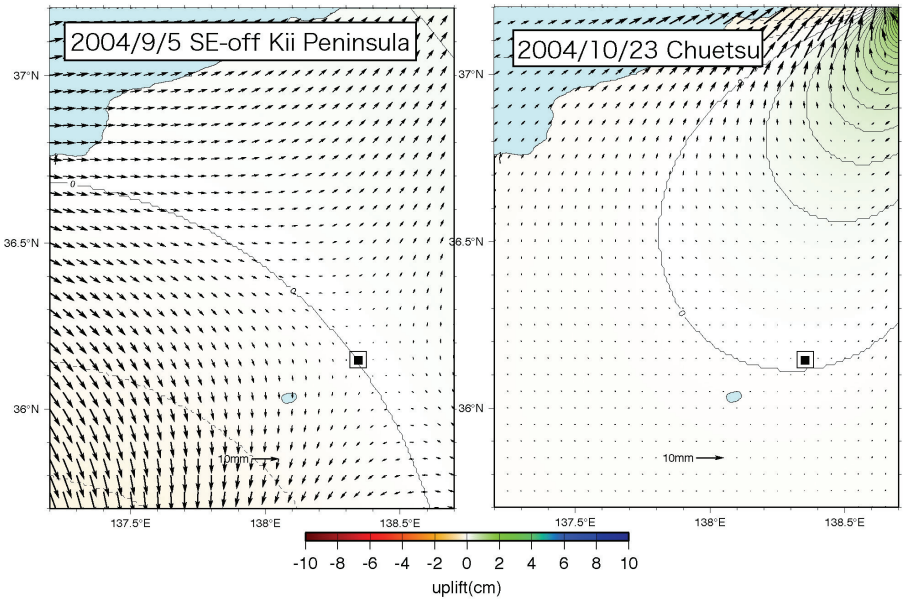

図４　地震に伴うと予想される変位場
2004 年紀伊半島南東沖地震（左）および 2004 年中越地震（右）に伴うと予想される臼田（二重の四角）に対する変位分布

図３からは以下のような特徴が分かる。(1)長野盆地西縁断層の西側は東向きの速度を持ち､断層付近の狭い範囲に変形が集中している｡(2)中央隆起帯では変形が非常に小さく、長野市以南では、その西縁付近が変形フロントになっている。 (3)明科(S036)付近を境に、北では逆断層型（西北西－東南東方向の短縮）から南では左横ずれ型と変形パターンが変わる。(4)従って、牛伏寺断層や糸静線中部（諏訪湖以南）は基本的に横ずれである。(5)跡津川の南東側では、全体的にベクトルが時計方向に回転しており、跡津川断層系が力学境界として機能しているように見える。

この観測期間中には 2004 年紀伊半島南東沖地震や 2004 年新潟県中越地震が発生している。図４は、国土地理院による断層モデル（国土地理院、 2005a、 2005b）に基づいて今回の観測地域周辺の地殻変動を臼田固定で見た時の変位分布である。紀伊半島南東沖地震では図の南西部、中越地震では北東部にやや顕著な地殻変動が予想され、図３に描いた２種類の速度ベクトルを見比べると、そのずれ方はこれら２つの地震の影響に対応しているように見える部分もある。大部分のキャンペーン観測点が設置された糸静線周辺では、こ

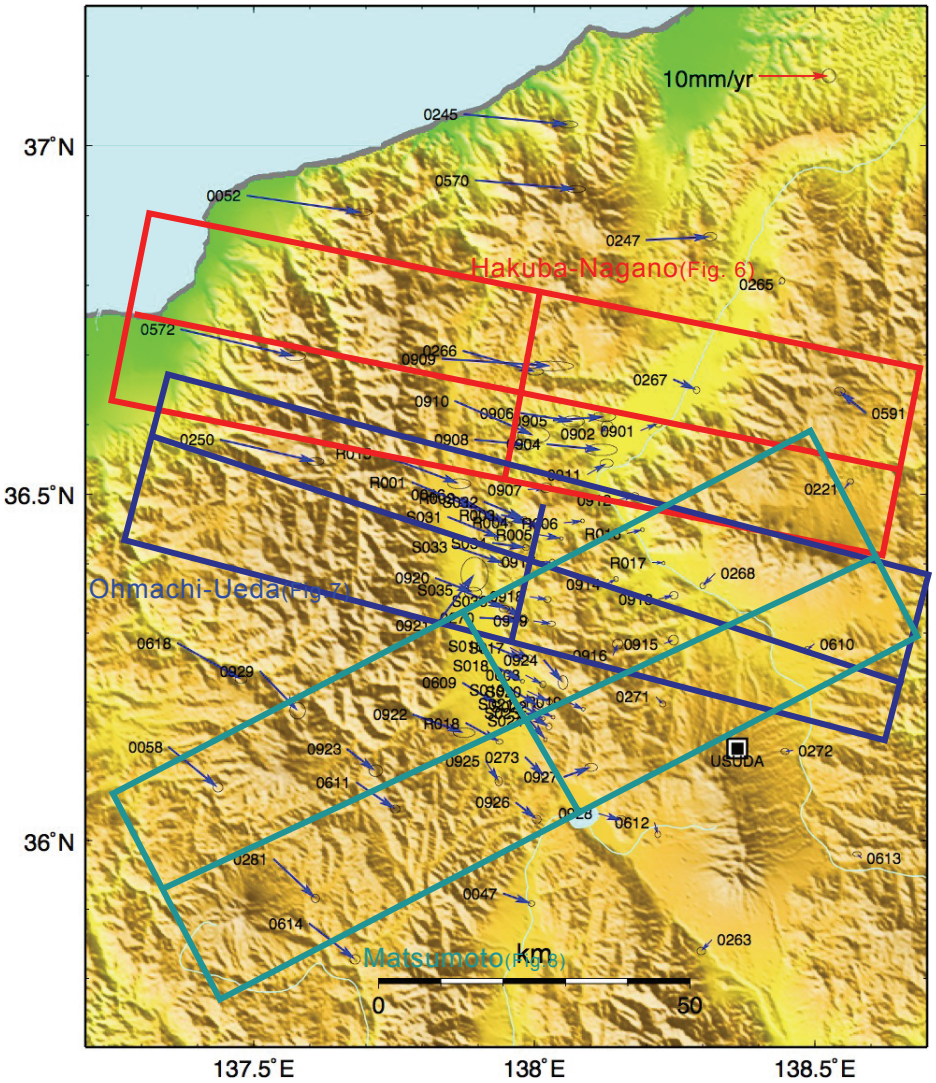

図５　2002－2005 年における糸魚川－静岡構造線断層帯周辺の水平地殻変動速度分布
稠密キャンペーン観測によって得られた全データを用い、臼田(USUDA)固定のベクトルを示した。矩形領域は図６－８に示す速度プロファイルの表示領域。

れら二つの地震に伴う地殻変動は 2mm 程度以下と予想され、キャンペーン観測の検出限界程度と考えられる。そこで、これらの地震の影響を無視し、アンテナ交換によるオフセットの補正のみを施して４年分のキャンペーン観測結果を使い求めた速度を図５に示す。図３と比べると隣接する観測点間での整合性が向上したように見える。

そこで、糸静線の北部から中部にいたる三カ所で横切るような測線について、図５の速度データを用いて速度プロファイルを作成した結果が図６－８である。白馬－長野を通る測線(図６)、大町－上田を通る測線(図７)、松本付近を横切る測線(図８)の３つのプロファイルにおいて地殻変動と活断層の関係について検討した。まず、白馬－長野測線では、N105° E 方向の速度成分が、糸静線（ISTL）と長野盆地西縁断層(WNBF)を横切るところでステップ状に変化していることが目に付く。この２カ所では、それぞれ 6-7mm/年の短縮がわずか幅 5km 程度の範囲で生じており、これらの断層が現時点では固着しておらず、ずるずるとすべっている可能性が考えられる。白馬付近では 1714 年、1858 年に比較的規模の大きい地震があり（M6-7 程度？)、長野付近では 1847 年に善光寺地震(M7.4)があった。これらの地震が発生する前には当然断層が固着し応力を蓄積していたと考えられ、その後 150 年以上もの間本当に固着が回復していないかどうか検討する必要がある。大町－上田測線では､大町付近の幅 30km 程度の範囲で N110° E 方向に 10mm/年程度の短縮が見られる。これは、連続観測を通して既に明らかになっていた内容であるが、キャンペーン観測でも再度確認された。なお、この場合、糸静線付近の歪み速度は 0.3ppm/年程度と非常に大きいものの、変形を起こしている領域の幅が狭いことから、周辺領域に蓄積されている弾性エネルギーの総量はあまり大きくなく、大地震につながるような歪み蓄積は現時点ではないものと考えられる。最後に、松本付近を通る測線では、糸静線を東北東－西南西に横切る測線の方向には変形が殆ど見られず、測線と直交する方向、すなわち断層の走向方向の変形が卓越する。変形のセンスは左横ずれであり、地形学的に考えられている牛伏寺断層の変形様式と一致する。また、この地域の特徴は左横ずれの歪みが断層周辺から南西側 50km 以上の広い範囲にほぼ一様に生じている点である。こうした変形様式は、上でみた２つの測線に代表されるような糸静線北部の変形様式とは全く異質である。また、断層の東側 15km ほどのところからは全く変形が見られなくなるのも特徴的である｡牛伏寺断層では地形学・地質学的手法により 8-9mm/年程度の平均変位速度が推定されているが、断層両側のブロックの測地学的な変位速度が地形学・地質学的な見積もりと同等の変位速度となるようにするためには、断層の周囲に幅 50km 以上もの広い領域を考える必要が生じてくる。こうした幅は断層の固着域の(深さ方向の)幅を反映すると考えられるが､50km 以上の幅、そしてほぼ一様な歪み分布を説明するためには地殻全体が弾性エネルギーを蓄えている状況を考える必要がある。以上の考察から、牛伏寺断層周辺の地震発生ポテンシャルは十分高いものと考えられる。

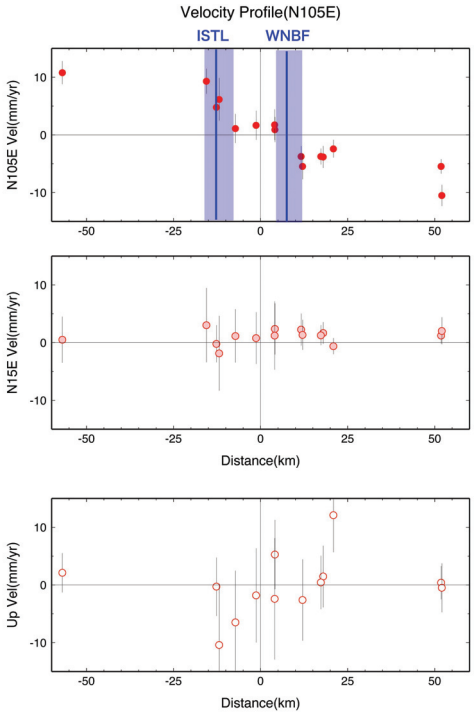

図６　白馬－長野方向の地殻変動速度プロファイル
ISTL は糸魚川－静岡構造線の位置を、WNBF は長野盆地西縁断層の位置を示す。それぞれの断層を横切るところで、プロファイルと平行な方向の速度成分がステップ的に変化している。

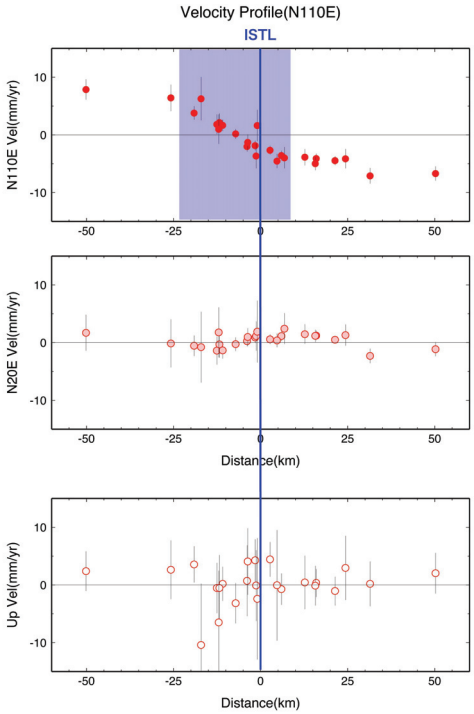

図７　大町－上田方向の地殻変動速度プロファイル
ISTL は糸魚川－静岡構造線の位置を示す。ISTL の周辺の幅 30km 程度の範囲で約 10mm/年の短縮が生じている。

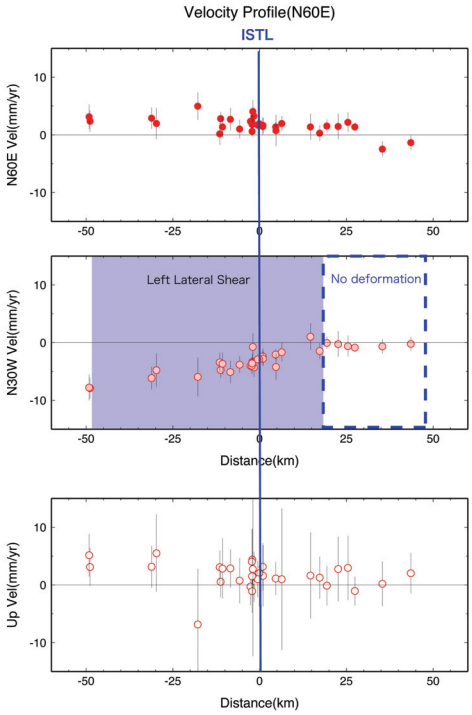

図８　松本周辺の地殻変動速度プロファイル
ISTL は糸魚川－静岡構造線の位置を示す。プロファイルと直交する（断層と平行な）成分にのみ有意な変化があり、断層周辺から南西側の広い領域で左横ずれの剪断歪みの蓄積が見られる。

(d)結論ならびに今後の課題

糸静線中・北部に設置した GPS キャンペーン観測の結果と周囲の連続観測点の地殻変動データを、合わせて解析する事により、断層周辺の詳細地殻変動分布が明らかになった。糸静線北部の白馬－大町付近と松本付近では、変形様式が大きく異なり、地震発生に関する応力蓄積メカニズムも異なると考えられる。また、観測期間中に発生した 2004 年紀伊半島南東沖地震や 2004 年新潟県中越地震による地殻変動はキャンペーン観測点では小さく、詳細地殻変動の推定に与える影響は小さいと言うことがわかった。

キャンペーン観測を有効に活用すると、既存の連続観測網を補完する稠密観測網を低予算で構築することが可能である。時間分解能は犠牲になるものの、mm レベルの地殻変動を十分検出できる。特に、糸静線北部地域のような変形が比較的大きい場所では、面的かつ詳細な変形の分布を求めるために有効な観測手段だと言える。また、こうした観測点を多数設置し、一度測定を行っておけば、地震、火山噴火等の発生時に再度測量することで地殻変動の全容を解明にも役立つ。現状の連続観測点網では、Mw6.5 程度の地震が起きても矩形断層１枚でほぼデータが説明できてしまうなど、対象とする現象によっては空間分解能が必ずしも十分とは言えず、こうしたキャンペーン観測の併用も十分検討に値する。

(e)引用文献

1）国土地理院，北陸地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，73，269-317，2005a.
2）国土地理院，中部・近畿地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，73，426-463,

2005b.
3) Sagiya. T., T. Nishimura, Y. Iio, T. Tada, Crustal deformation around the northern and central Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Earth Planets Space, 54, 1059-1063, 2002.
4) Sagiya T., T. Nishimura, and Y. Iio, Heterogeneous crustal deformation along the Central-Northern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line Fault System, central Japan, Earth Planets Space, 56, 1247-1252, 2004.

(3) 平成 18 年度業務計画案

平成 18 年度においては、従来手薄だった糸魚川−静岡構造線断層帯中部（諏訪湖周辺）においてキャンペーン観測点８点を新設して、１週間程度の GPS 観測を行なう。GPS 観測データは周囲の連続観測点とともに解析し、平成 19 年度以降に行なう観測の基準座標値とするために、新設点の座標を精度良く決定する。また、既設の観測点においても１週間程度の GPS 観測を行ない、平成 17 年度以前に観測した結果と統合して解析し、地殻変動の観測精度と信頼性を高める。平成 18 年度に観測を行なう観測点は、新設点と諏訪湖周辺の既設点、興味深い地殻変動が見つかっている地域を優先して、全体として 28 ヶ所とする。GPS 基線解析に関しては、国土地理院・名古屋大学等によって周辺に新設された GPS 連続観測点も合わせて解析を行なうことにより、詳細地殻変動の解明を行なう。

表１　キャンペーン観測点の座標値と設置場所

観測点 ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	設置場所
02R901	-3821748.454	3418336.073	3781359.725	長野市立博物館
02R902	-3817853.894	3423353.351	3780980.795	茶臼山自然史館
02R904	-3812736.573	3430443.049	3779644.259	信州新町化石博物館
02R905	-3811751.760	3428115.579	3782722.597	中条中学校
02R906	-3807745.137	3431620.502	3783696.989	小川中学校
02R907	-3814196.636	3435732.659	3774050.168	大岡村役場
02R908	-3805024.175	3438928.837	3780576.430	美麻小中学校
02R909	-3795773.005	3437566.690	3790788.211	白馬ジャンプ競技場
02R910	-3800054.429	3438704.194	3785419.320	白馬クロスカントリー競技場
02R911	-3819209.164	3427466.799	3775747.635	治田小学校
02R912	-3824218.162	3425559.447	3772401.206	戸倉上山田中学校
02R913	-3835714.019	3426982.402	3759729.270	東塩田小学校
02R914	-3829128.721	3432251.585	3761712.305	青木村役場
02R915	-3839510.314	3429227.233	3754096.791	武石村中央公民館
02R916	-3835140.062	3436242.092	3752809.330	ベルデ武石
02R917	-3820617.767	3438575.562	3764733.533	本城小学校
02R918	-3821813.289	3442200.227	3760190.966	会田小学校
02R919	-3823982.841	3443335.756	3757081.456	四賀村化石館
02R920	-3810441.454	3452242.465	3762617.536	有明高原寮
02R921	-3813898.442	3455299.263	3756498.024	ほりでーゆー
02R922	-3817640.528	3463607.129	3745046.467	安曇小中学校
02R923	-3813221.178	3473875.215	3740838.766	大野川小中学校
02R924	-3828011.145	3444719.511	3752240.385	レイクサイド美鈴
02R925	-3828768.173	3457940.500	3738945.067	洗馬小学校
02R926	-3834928.681	3457051.682	3733667.750	両小野中学校
02R927	-3838342.184	3449718.742	3736948.477	上の原小学校
02R928	-3844542.652	3447830.809	3732195.537	諏訪市役所
02R929	-3798073.978	3479006.722	3750683.589	栃尾中学校